干旱区自然资源地表基质细化分类体系构建与调查深度

李双媛[1,2,3,4]， 徐 柱[5]， 王玉刚[2,3,4]， 孙金金[2,3,6]

（1. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室，北京 100055；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，干旱区生态安全与可持续发展重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 中国科学院阜康荒漠生态系统国家站，新疆 阜康 831505；5. 新疆天池管理委员会博格达生态环境监测站，新疆 阜康 831500；6. 自然资源部塔里木河流域下游水资源与生态效应野外科学观测研究站，新疆 乌鲁木齐 830057）

摘 要：地表基质分类是开展地表基质调查监测的基础，同时也是揭示地表基质与地表覆盖层的协同耦合关系的关键，有助于从地表覆被和地下空间要素两个层次认识地表基质与生态环境的作用机制。本研究以干旱区典型的内陆河流域——新疆三工河流域为靶区，依据干旱区山地-绿洲-荒漠景观异质性分布特征，在地表基质的分布区域、海拔范围及主要地表覆被的基础上，构建了一套地表基质三级分类分区体系。整体划分为4个地表基质一级类、17个二级类及28个三级类。根据土壤理化性质及植被根系分布特征，地表基质调查深度在南部山区以50 cm；中部平原区以3 m；北部沙漠区小于10 m为宜。此外，基于垂直带生态系统NPP的分异性特征，验证了分类体系的合理性，体现了地表基质层孕育支撑土地覆被的作用关系。研究成果为未来干旱区自然资源调查监测和科学管理决策提供理论与技术支撑。

关键词：地表基质；地表基质分类；调查深度；干旱区；三工河流域

地表基质的概念在2020年自然资源部发布的《地表基质分类方案（试行）》[1]（以下简称分类方案）中明确，结合地质学、林草学、土壤学、水文学等不同领域中相关的定义和学科基础，其含义可总结为“当前出露于地球陆域地表浅部或水域水体底部，主要由天然物质经自然作用形成，正在或可以孕育和支撑森林、草原、水等各类自然资源的基础物质”。地表基质层从地面开始，自土壤一直延伸至基岩顶部或包气带底部，是连接地下和地上资源的纽带[2]。不同的地表基质孕育了不同的植被类型，制约着区域生态系统的空间格局和演化趋势[3]。开展地表基质层调查是构建完整统一的自然资源立体综合调查监测体系重要组成部分，地表基质调查数据与成果能够为自然资源统一管理、国土空间统一规划、综合利用以及生态环境系统的保护修复提供有效支撑。

地表基质层是地表覆盖层生长发育的主要承载体，是支撑林、草、水体等各类资源的基础物质，对生态环境的形成、演变过程及稳定性具有重要作用[4]。地表基质层同地表覆盖层及地下水之间存在养分交换，地表覆盖层也与浅层地下水和大气之间存在水热交换[5]，各要素间的水文循环及能量交换决定了生态系统的本底特征[6]。因此，地表基质调查应注重研究植被覆盖层及其下部地表基质的对应性，关注包气带中水、气、元素的运移交换等。目前，地表基质层的分类细化体系研究相对薄弱，部分地区存在地表基质层与覆盖层不匹配的问题；地表基质分类需注意地表基质与林、草自然资源之间的匹配关系，从而明确其与不同生态植被的协同适宜性[3]。科学认识自然资源地域功能及差异，揭示地表基质与地表覆盖层的协同耦合关系，以适度、有效开发利用资源，减少和避免生态破坏，是缓解

收稿日期：2024-08-09； **修订日期：**2024-11-09
基金项目：自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放课题（2022KFKTC016）；“天山英才”培养计划（2023TSYCLJ0048）
作者简介：李双媛（2000-），女，硕士研究生，研究方向为景观尺度土地资源. E-mail: lsy000615@126.com
通讯作者：王玉刚. E-mail: wangyg@ms.xjb.ac.cn

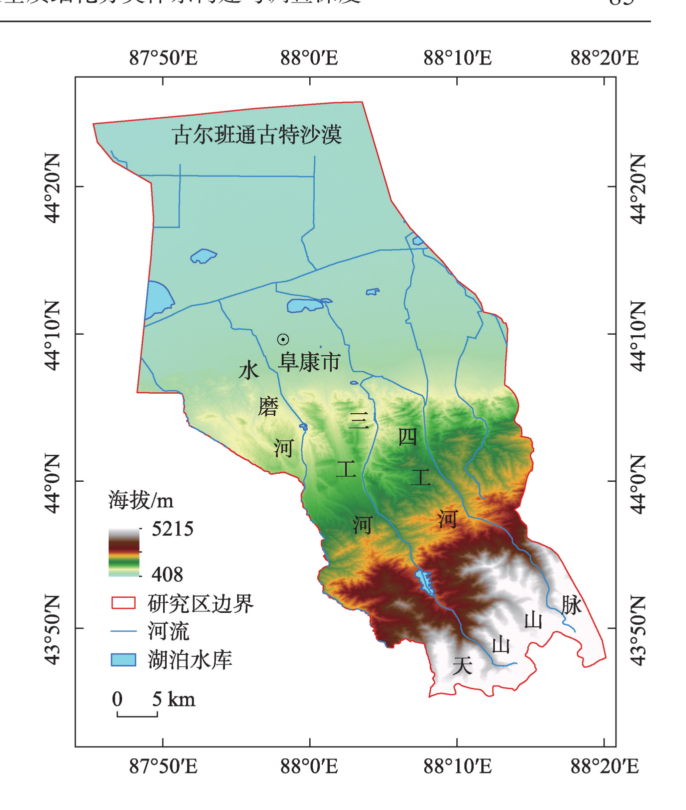
资源利用与环境保护矛盾的必要选择。

地表基质的划分要求能够体现区域生态服务目标，真实全面地反映地表基质基本状况，并根据实际情况因地制宜地进行分类。岩石、砾质、土质及泥质分别代表了地表基质发育、发展过程的不同阶段，是维系地球生态系统功能和人类生存的物质基础[7]。《分类方案》将地表基质分为岩石、砾质、土质、泥质4个一级类14个二级类，在具体地区的实际运用中，三级分类缺乏明确的细化方案。现已有多名学者结合不同典型地区对地表基质调查方向进行了探索，然而，这些研究主要集中在南方及黑土地区，对干旱区地表基质细化分类体系及应用的探讨较少[8-11]。目前，干旱区地表基质质量综合评价方面尚未形成指标体系，还存在地表基质层调查成果表达难的问题。

因此，本研究以三工河流域为靶区，收集整理区域土地利用数据、遥感影像数据、土壤剖面数据、植被覆盖类型、水文地质数据等信息，在《分类方案》中地表基质一级和二级的基础上，对研究区地表基质类型、垂直分带、植被分布及基质中附属或附着于主体成分之内的其他物质成分等情况进行调查，细化完成区域适宜的三级分类方案。从地表基质分类标准与代表性区域范围、植被覆盖层的对应性等方面出发，建立干旱区地表基质的分类指标体系。通过实地调查与实验测定，验证区域地表基质分类体系的可行性和准确性，以期为不同空间尺度区域地表基质细化分类提供可借鉴的思路。

1　研究区概况

三工河流域地处天山北麓中段东部，准噶尔盆地南缘（87°46′~88°44′E，43°45′~45°30′N），属于典型的温带大陆干旱性气候（图1）。海拔437~5152 m，区域高度差悬殊，地势南高北低，加之北临古尔班通古特沙漠，区域内温度由南向北逐升。年均降雨量集中在4—9月份，降水总量约占全年总量的80%。水资源较为丰富，主要依赖高山冰川积雪融水和大气降水。研究区具有典型的“山地-平原-荒漠”完整垂直地带性地理地貌特征，主要分为南部山区、中部平原、北部沙漠3个单元，由南到北可分为高山草甸带、中山森林带、低山丘陵带、冲-洪积扇、冲-洪积平原、风积沙漠6种地貌类型。区域内地层构造南部山区相对复杂，北部平原区相对简单；地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水，地下水剖面分布受地层岩性、区域地貌等因素控制[12]。



注：底图采用新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图制作，审图号为新S(2021)046号，对底图边界无修改。下同。

图1　三工河流域概况图

Fig. 1　Overview of Sangong River Basin

2　数据与方法

2.1　数据来源与处理

2.1.1　土壤数据　结合土地利用方式与灌溉方式的分布特征，在研究区中部平原绿洲区选取不同土壤类型、不同土地利用类型、不同浇灌方式的土壤，以不同地下水埋深为分组依据，农田样地以及相邻位置的自然背景原始荒漠样地为一组，共2组剖面样点（S1&S2，S3&S4），样点具体情况如表1所示；以20 cm为间隔，采集土壤样品直至潜水位为止，共采集剖面样品数118个。将采集的土样放在通风室内

表1　采样点土地利用类型及特征

Tab. 1　Landuse and characteristics of sampling sites

编号	土地利用类型	灌溉方式	灌溉水源	采样数量	水位埋深/m
S1	荒漠	–	–	29	5.8
S2	农田	滴灌	地下水	32	6.4
S3	荒漠	–	–	28	5.6
S4	农田	滴灌	地下水	29	5.7

自然风干，充分研磨、过2 mm土样筛后备用；根据《土壤农业化学分析方法》[13]测试方法确定土壤各离子组成，分层说明土壤易溶盐离子及盐分含量随深度的变化。三工河流域土地利用、水文地质、植物根系等数据来自新疆阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站历史调查数据。

2.1.2 气象与遥感数据 本研究采用气象数据包括温度和降水数据，遥感数据包括太阳辐射、DEM、NDVI，以及植被覆盖类型数据等，具体数据格式和来源见表2。

本研究采用Excel进行数据整理，SPSS 26软件进行数据分析，ArcGIS 10.8软件和Origin Pro 2024软件进行图形绘制及可视化。

2.2 研究方法

2.2.1 CASA模型 实际NPP（Actual Net Primary Productivity，NPP_A）是指基于遥感数据或模型计算的现实情况下的NPP，由气候因子和人类活动的共同作用驱动形成。CASA模型在整合多种环境数据的基础上，实现区域植被净初级生产力的模拟，模型模拟结果具有较好的准确性，因此被广泛应用于NPP的研究中。本文中所用的NPP_A采用朱文泉等[16]改进的CASA模型计算得到，计算公式详见于文献[17]。模型所使用的气象数据及遥感数据见表2，所有数据经重投影、镶嵌、裁剪、单位换算及重采样等前处理，用于模型运算及数据分析。

2.2.2 地表基质分区分类 本研究从地表基质与地表覆盖层关系的角度，按照地貌类型将研究区划分为南部山区、中部平原区和北部沙漠区（图2），提出适用于研究区的地表基质分区分类。在南部山区范围内，海拔大于3500 m为高山冰雪覆盖区，发育着现代冰川；由于地表基本无植被生长，未单独展现在地貌分区与地表覆盖关系示意图中。本研究区有隔水层存在，主要分布于中部平原的冲洪积扇缘及冲洪积平原上部，岩性为粉细砂、亚砂土、亚黏土和黏土互层。由于隔水层的存在，导致在冲洪积扇缘与冲洪积平原上部形成地下水溢出带，上下两层含水层没有水力联系，在分类时需要单独考虑。

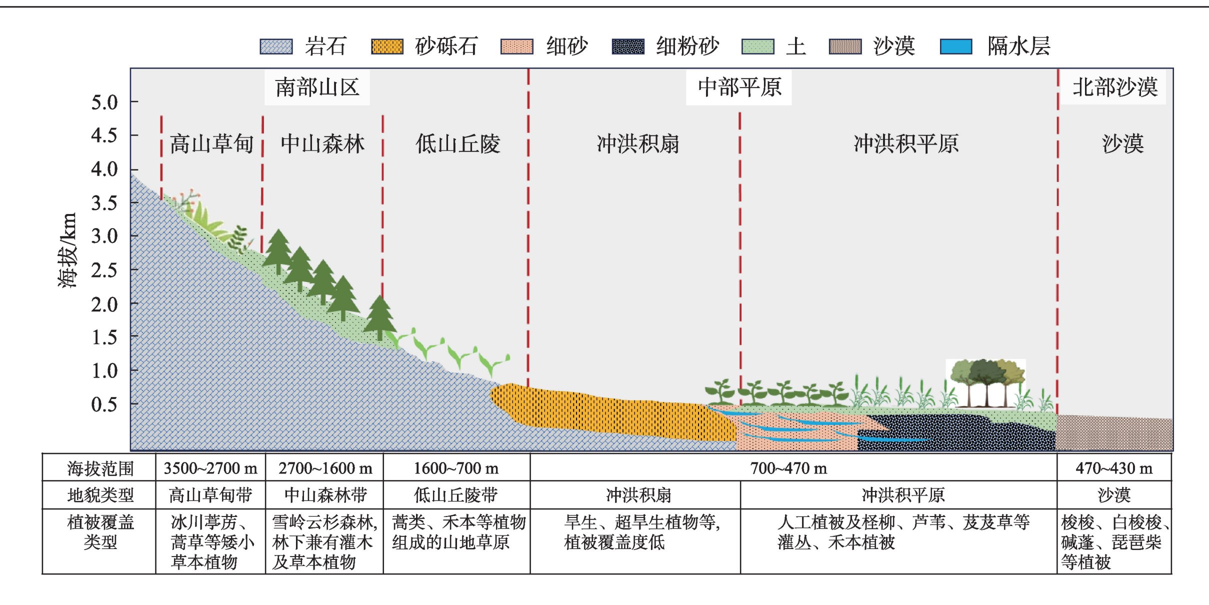
根据研究区实际情况，细化分类结合自然资源部《地表基质分类方案（试行）》中岩石和砾质的一级、二级分类。岩质的三级分类参考《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001）（2009年版），综合地表覆盖层特征，以岩石坚硬程度进行细化分类。砾质的三级分类依据地貌及成因类型划分，体现地形、地貌对地表基质发生发育过程的影响。试行分类方案中的土质二级类采用粒级、质地、组成、成因等作为分类依据，突出了最主要的物理特性；然而，沉积物的粒度往往具有过渡性，且未能体现其与地表覆盖层的关联性。因此，土质的二级分类参考《中国土壤分类与代码》（GB 17296—2009），综合考虑干旱区景观山盆体系的植被分异规律，根据成土过程的共同特点，体现植被与土质间的直接关联关系；土质三级类根据土壤性质及分布范围划分。

2.2.3 地表基质分类体系合理性及调查深度验证 净初级生产力（NPP）是量化植被固碳能力及绿洲生态效应的重要指标，其数量变化能反映植被对地表基质变化的响应[18-19]。为此，识别三工河流域NPP的时空格局特征，能够验证本分类体系地表基质层与植被覆盖层的对应关系，并间接体现该分类体系

表2 数据及来源

Tab. 2 Data and sources

数据类型	数据名称	数据精度	数据格式	简介及来源
气象数据	温度、降水数据	1 km	TIFF	采用1901—2022年中国1 km分辨率逐月平均气温和降水量数据集（http://www.geodata.cn），时间序列为1990—2020年
	太阳辐射数据	1 km	TIFF	太阳总辐射数据通过日照百分率数据换算得到。本文使用的日照百分率数据来源于国家气象科学数据共享服务平台（http://data.cma.cn），时间序列为1990—2020年。通过和清华等[14]的方法计算太阳总辐射值
遥感数据	DEM数据	30 m	TIFF	采用ASTER GDEM产品，来自地理空间数据云（https://www.gscloud.cn）
	NDVI数据	30 m	TIFF	采用Landsat影像数据，来自谷歌地球引擎（Google Earth Engine，GEE）平台时间序列为1990—2020年。影像的调取和处理基于GEE云平台，其中1990—2011年和2013—2020年的影像分别选用Landsat 5和Landsat 8数据。经去云、大气校正和裁剪等前处理，通过计算公式[15]进行NDVI的计算
	植被覆盖类型数据	500 m	TIFF	采用MODIS MCD12Q1（https://search.earthdata.nasa.gov/search)的年度合成产品，时间序列为2001—2019年



海拔范围	3500~2700 m	2700~1600 m	1600~700 m	700~470 m		470~430 m
地貌类型	高山草甸带	中山森林带	低山丘陵带	冲洪积扇	冲洪积平原	沙漠
植被覆盖类型	冰川葶苈、蒿草等矮小草本植物	雪岭云杉森林,林下兼有灌木及草本植物	蒿类、禾本等植物组成的山地草原	旱生、超旱生植物等,植被覆盖度低	人工植被及柽柳、芦苇、芨芨草等灌丛、禾本植被	梭梭、白梭梭、碱蓬、琵琶柴等植被

图2　三工河流域地貌分区及植被覆盖示意图

Fig. 2　Schematic diagram of geomorphologic zoning and vegetation cover of the Sangong River Basin

在区域地表基质调查应用中的合理性。地表基质的调查深度需要根据区域所支撑的生态服务目标厘定,研究区南部山区地表基质调查主要考虑支撑服务植被群落的功能需求,一般调查深度以观测到地表植被地下根系深度为宜。中部平原区一般调查深度以厚层包气带土壤水盐运移引发地表积盐深度为宜,反映地表基质对农业生产、支撑植被群落与生态保护的支持能力。北部沙漠区域地表基质调查主要服务于支撑植被群落和生态保护的需求,调查深度应以观测到地表植被地下根系深度为宜。地表基质关键层是指对植被和农作物生长、水盐储存和运移等具有重要控制和影响作用的岩土层,在地表基质调查研究中应予以重点关注。针对不同地貌分区,分别开展对典型地表基质关键层的土壤理化性质特征以及主要植被根系垂直分布特征的调查分析,以明确干旱区自然资源不同地貌分区地表基质的调查深度。

3　结果与分析

3.1　地表基质分类方案

3.1.1　*南部山区地表基质分类方案*　研究区南部山区海拔范围大于700 m,除去基本无植被生长的高山冰雪带(海拔>3500 m),主要包括有高山草甸带、中山森林带及低山丘陵带3种地貌类型。岩石基质根据成因类型和岩石坚硬程度分类3个二级类和6个三级类。其中,较坚硬岩浆岩类和较坚硬变质岩类主要分布于南部山区高山带及中山带,海拔大于1600 m,为高、中海拔岩石区;坚硬沉积岩类和较软沉积岩类主要分布于南部山区中山森林带,海拔约1600~2700 m,为中海拔岩石区,植被主要为雪岭云杉组成的纯林森林,兼有灌木及草本植物组成的林下草原;较坚硬沉积岩类和软质沉积岩类主要分布于南部山区低山丘陵带,海拔约700~1600 m,为低海拔岩石区,地表覆被以蒿类、禾本植物等组成的干草原为主。砾质二级类主要有巨砾,三级类包括分布于高山冰雪带的高山冰碛巨砾和分布于低山丘陵带的低山丘陵巨砾。

土质的分类相对岩石和砾质更加细化,按照成土过程和土壤性质可分为4个二级类和7个三级类(图3)。其中,高山漠土分布于南部山区的高山冰雪覆盖区,海拔大于3500 m,为高山冰雪带,植被稀疏,主要植被为冰川葶苈、蒿草、雪莲等矮小草本植物;高山草甸土分布于南部山区的高山带,海拔约3000~3500 m,以蒿草、苔草、小莎草、斗篷为主组成的高山草甸;亚高山草甸土分布于南部山区的亚高山带,海拔约2700~3000 m,对应由蒿草、苔草、老鹳草、唐松草、羊茅、新疆圆柏等组成的亚高山草甸;山地灰褐土和黑钙土分布于南部山区的中山森林带,海拔约1600~2700 m,植被覆盖主要为云杉林与中生禾草、杂类草甸草地;栗钙土和棕钙土分布于南部山区的低山丘陵地带,海拔约700~1600 m,为蒿类、禾本植物组成的山地草原,覆盖度在20%~40%。

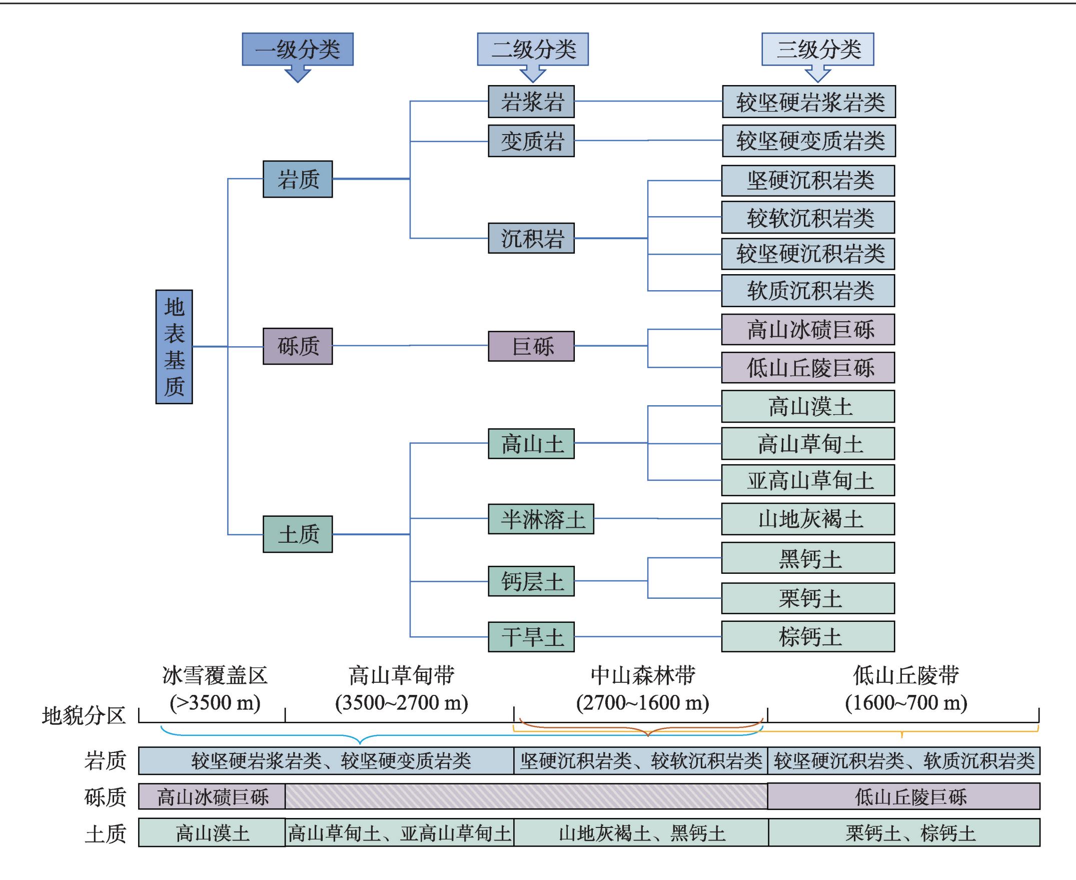


图3 南部山区地表基质分类方案及分布情况

Fig. 3 Classification of ground substrates in the Southern Mountainous Regions

3.1.2 中部平原区地表基质分类方案 中部平原区海拔范围为470~700 m，主要包括冲洪积扇和冲洪积平原两大地貌类型。岩石的二级分类主要为沉积岩，根据坚硬程度划分三级主要为极其软质沉积岩类。其中，极其软质沉积岩类主要分布于中部平原冲洪积扇区，巨砾、粗砾和中砾主要分布于中部平原区砾质戈壁带和冲洪积扇，细砾分布于冲洪积平原上部；主要植被为稀疏的旱生、超旱生植物，植被覆盖度低。砾质的二级包括巨砾、粗砾、中砾和细砾4个类型；三级类包括冲洪积扇巨砾、冲洪积扇粗砾、冲洪积扇中砾、冲洪积扇细砾和冲洪积平原细砾5个类型。

土质可分为4个二级类(漠土、半水成土、人为土、盐碱土)和6个三级类(图4)。其中，灰漠土、灰棕漠土及隔水层黏土分布于山前戈壁砾石带的洪积扇区中上部，植被以蒿类荒漠草原及盐柴类半灌木荒漠草地为主；草甸土和灌淤土分布于冲洪积扇下部扇缘带和沿河平地，该区域以耕地及芦苇、芨芨草等植被为主；草甸盐土和漠境盐土分布于扇缘带及中部平原区冲洪积平原或三角洲，植被以人工植被及柽柳、芦苇、芨芨草等灌丛为主。此外，该区域存在隔水层，因隔水层黏性土的渗透系数小，含砂粒很少，水分不容易从中通过，具有较好可塑性；故增加了其他类(隔水层黏土)。

3.1.3 北部沙漠区地表基质分类方案 研究区北部沙漠区海拔约430~470 m，地表基质以土质为主，按照成土过程的共同特点以及土壤性质上的某些共性将二级类主要划分为初育土，根据土壤性质及分布范围将三级类划分为风沙。该区域地表基质相对应的植被覆盖类型主要为梭梭、白梭梭、琵琶柴、碱蓬、骆驼刺等植被，伴生有一些多年生草本植物，植被覆盖度在3%左右，短命植物种类相对较为丰富(表3)。

3.1.4 地表基质层与植被覆盖层的对应性 如图5所示，三工河流域的 NPP_A 具有明显的空间异质性。从空间分布看，研究区31 a的 NPP_A 均值的高值区主要分布在南部山区中山森林带(508.62 g C·m^{-2}·a^{-1})和中部平原冲洪积扇绿洲区(334.2 g C·m^{-2}·a^{-1})，低值区主要分布在北部沙漠区(77.64 g C·m^{-2}·a^{-1})和南部山区高山草甸带(121.21g C·m^{-2}·a^{-1})。结合初

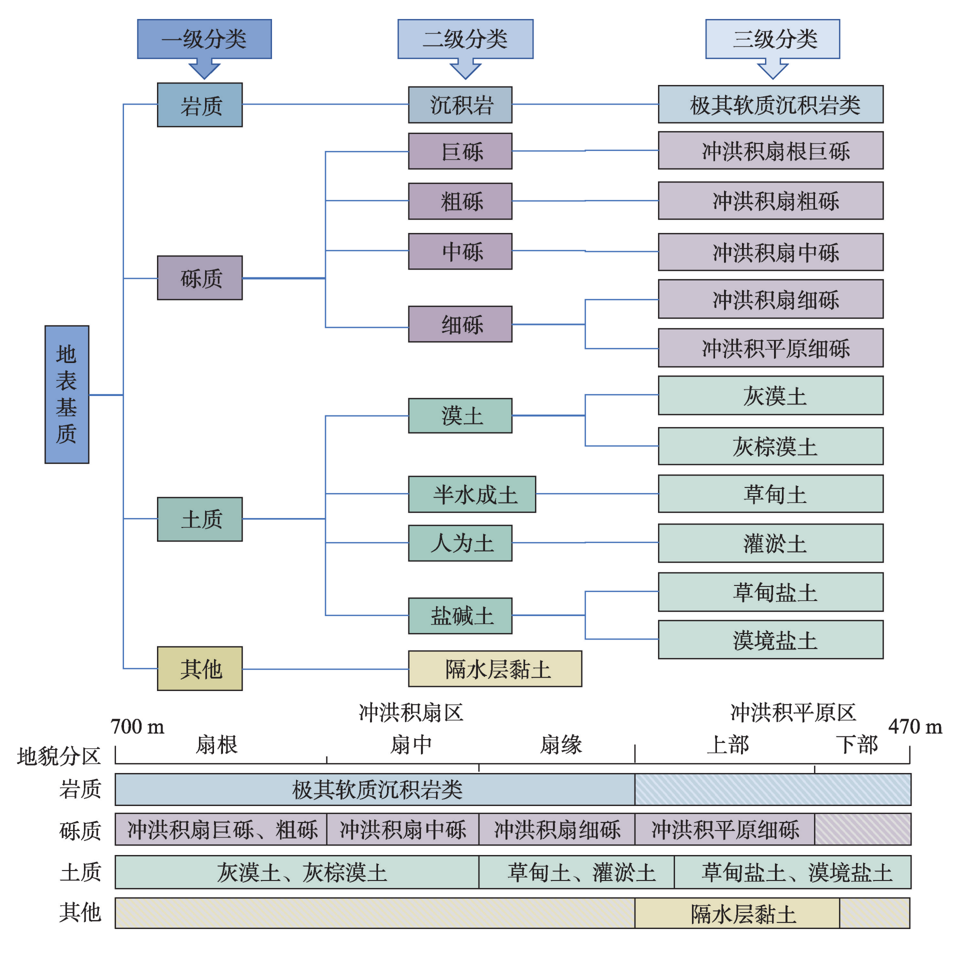


图4　中部平原区地表基质分类方案及分布情况

Fig. 4　Classification of surface substrates in the Central Plains Region

表3　北部沙漠区地表基质分类方案

Tab. 3　Classification of ground substrates in the Northern Desert Area

一级分类	二级分类	分类定义	三级分类	主要分布区域及海拔范围	主要植被类型
土质	初育土	土壤发育程度微弱,保持相对的幼年阶段,土壤剖面层次分异不明显	风沙土	分布于北部沙漠区,海拔约430~470 m	梭梭、白梭梭、琵琶柴、碱蓬等植被

步分类对比的结果看,不同地貌类型区的植被组成受不同因素的影响,存在明显的区域性差异,符合本分类方案中不同地表基质类型相对应分布区域的植被覆盖特征。综合区域现有研究,该区域不同植被类型和不同土地利用类型的NPP时空格局也表现出明显的空间异质性[20-21];区域植被覆盖度研究表明,高植被覆盖带主要位于平原中部和天山中麓(雪岭云杉林区),绿洲边缘区植被覆盖较低[22]。综上,此区域植被覆盖情况与NPP均值的空间分布趋势具有一定的规律性,均与本分类方案中不同地表基质分布范围和植被覆盖层的对应关系一致,体现了该分类体系在区域地表基质调查应用中的合理性。

3.2　地表基质分类体系调查深度

3.2.1　南部山区调查深度　研究区南部山区分布着基岩风化壳和残坡积物,地表基质调查主要考虑支撑服务植被群落的功能需求,一般调查深度以观测到地表植被地下根系深度为宜。南部山区植被调查发现,高山草甸带以冰川葶苈、蒿草、雪莲等矮小草本植物为主,植被覆盖度低,草本植被根系主要集中分布在20~30 cm深度范围。中山森林带植被覆盖为雪岭云杉及林下草原,植被覆盖度较高,植被根系深度集中分布在20~50 cm深度范围(图6a~图6c)。低山丘陵带植被覆盖主要由蒿类、禾本植物组成,植被覆盖度为20%~40%,植被根系主要集

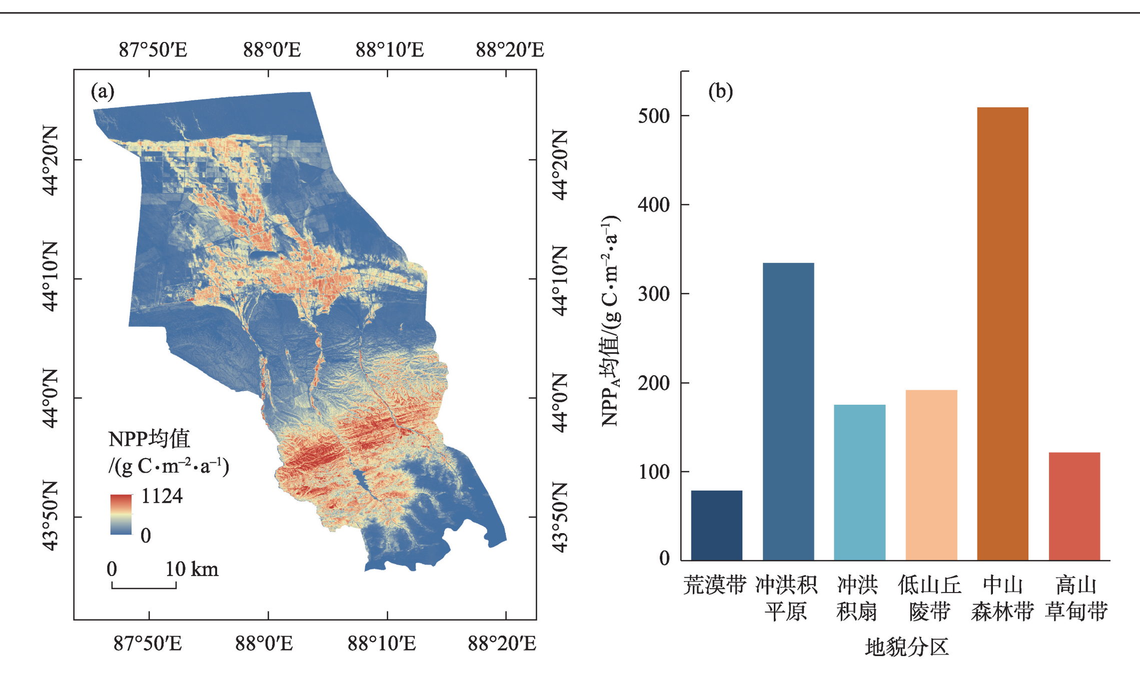


图5 三工河流域NPP$_A$平均值的空间分布(a)与不同地貌分区特征(b)

Fig. 5 Spatial distribution of mean NPP$_A$ values (a), and characteristics of different geomorphological subdivisions (b) of the Sangong River Basin

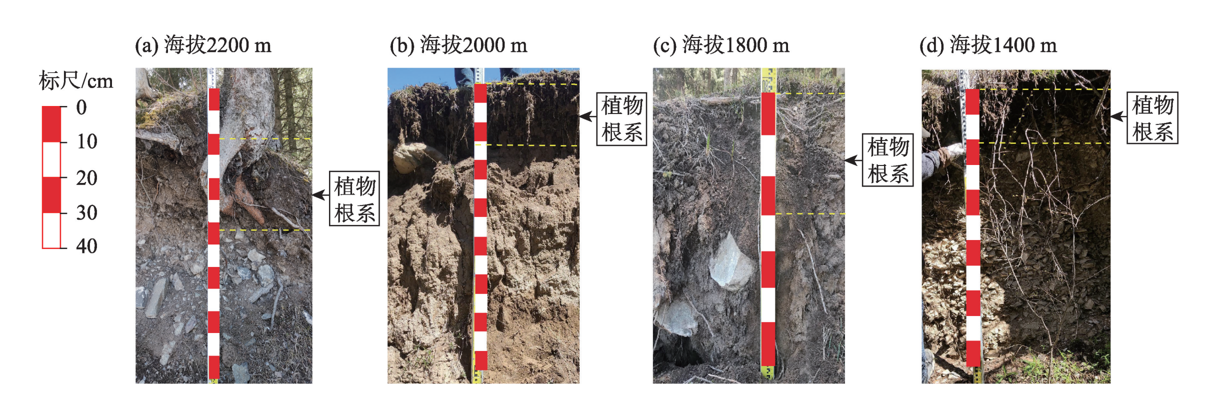


图6 南部山区不同海拔地表基质关键约束层典型剖面图

Fig. 6 Typical profiles of key constraint layers of ground substrates at different elevations in the southern mountainous region

中分布在20~30 cm深度范围(图6d)。总体而言,南部山区不同海拔生长的植物根系整体集中在0~50 cm土层。

3.2.2 中部平原区调查深度 由中部平原区农田剖面易溶盐离子含量及全盐量变化趋势(图7)可以看出,S2(图7a)土壤剖面全盐量及大部分离子浓度在地表处均为最大值,在剖面0~1 m段表现为随深度增加而减少,1~1.2 m段随深度增加;在1.2~6.4 m段均处于剖面中一个相对较低的水平,且变化幅度较小。S4(图7b)在0~0.3 m段土壤全盐量及大部分离子浓度为整个剖面上的峰值,并随深度增加而递减;0.3~1.1 m土壤全盐量减小至1.42 g·kg^{-1},随后波动增加;1.1~1.9 m土壤全盐量及各离子浓度随深度波动而增加;1.9 m以下土壤盐离子(除CO_3^{2-})与全盐含量随深度变化相较趋于稳定,均处于剖面中相对较低的水平。农田剖面土壤盐分呈现表聚型,可能是由于土壤底层或地下水的盐分随毛管水上升到地表,水分蒸发后,易溶性盐分在土壤表层积累。故S2、S4点位在>1.2 m和>1.9 m的土壤剖面中,水盐运移能够引发地表积盐。

由中部平原区原始荒漠采样点剖面易溶盐离子含量及全盐量变化趋势(图8)可以看出,S1样地(图8a)土壤全盐量在剖面的0~1.8 m段随深度增加表现为先增加再减小的趋势,后随深度增加而波动

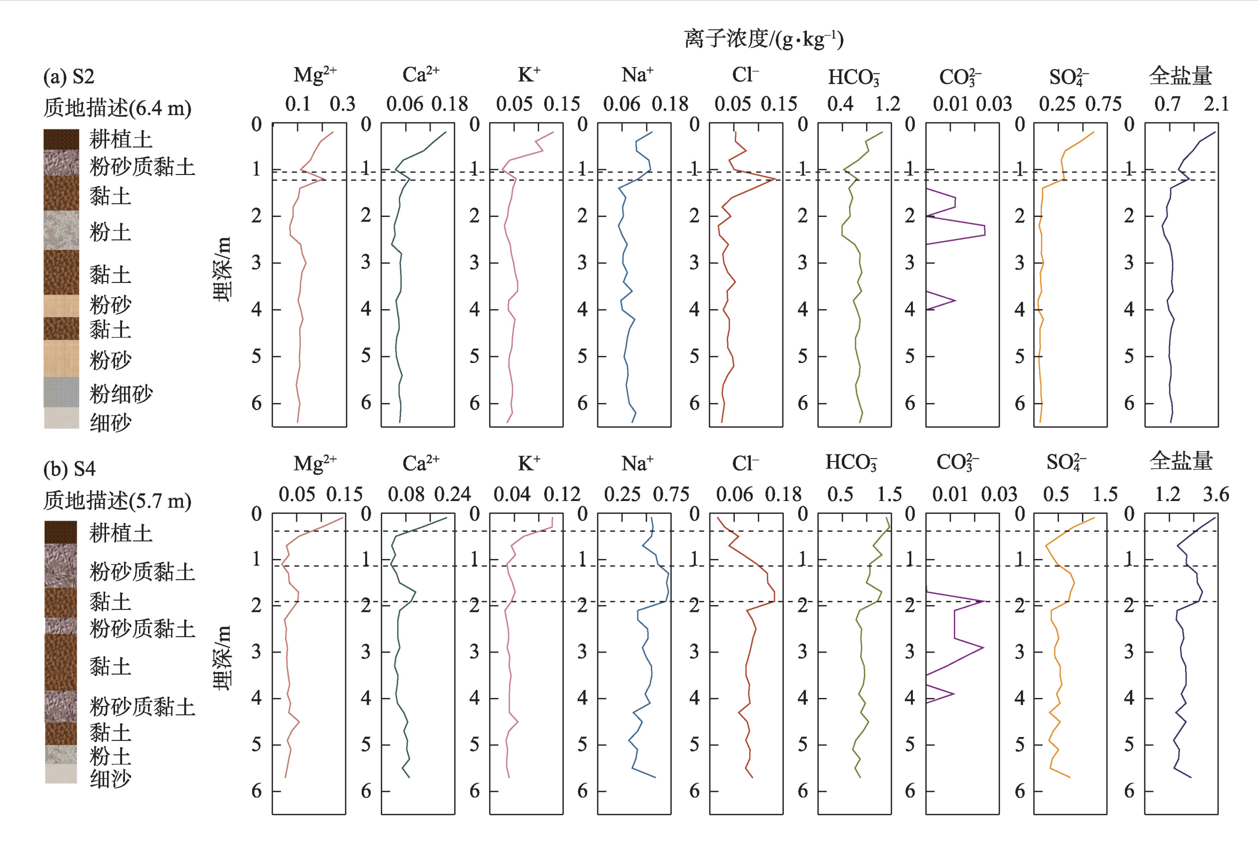


图7 S2、S4农田土壤剖面各离子含量及全盐量变化趋势

Fig. 7 Trends in the content of various ions and total salinity in S2 and S4 agricultural soil profiles

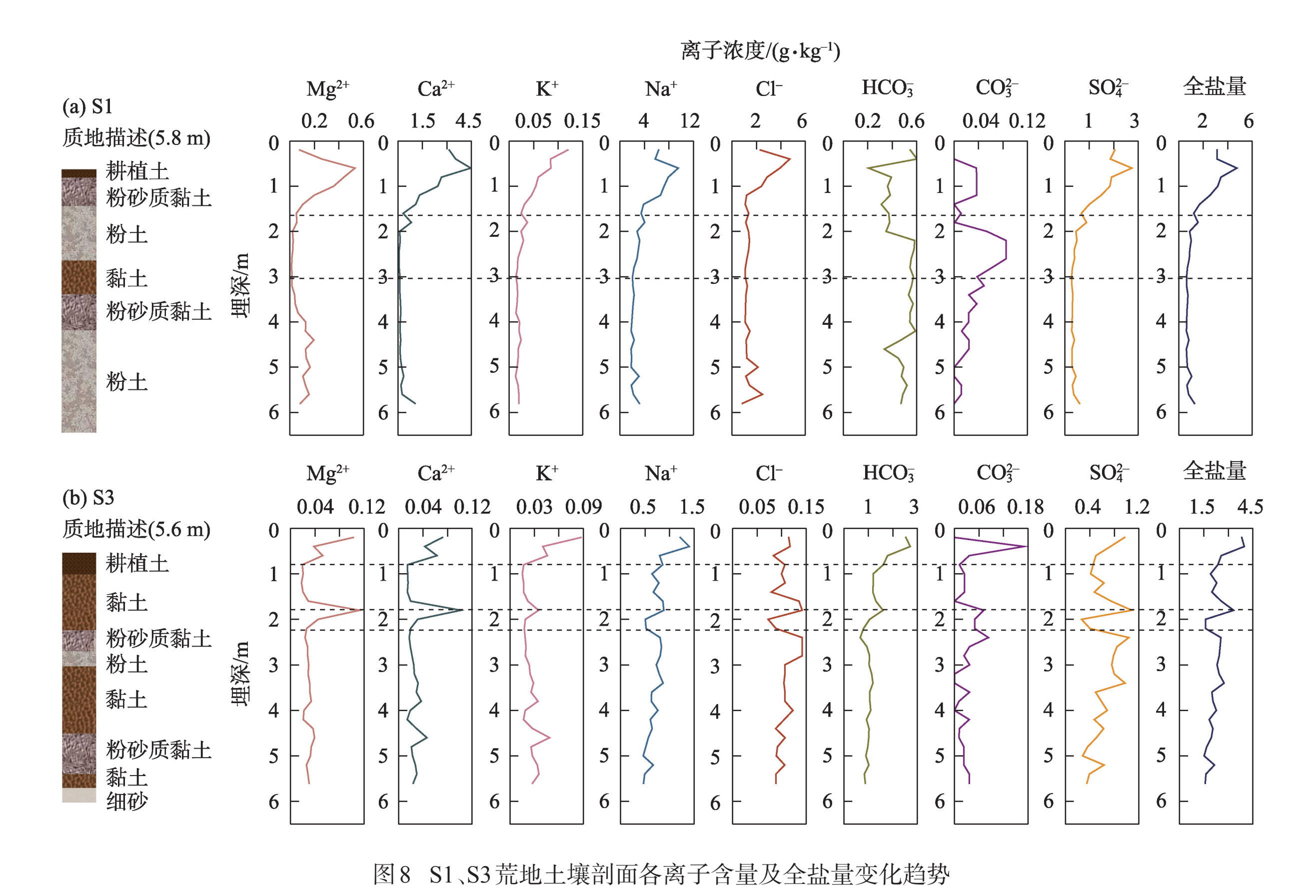


图8 S1、S3荒地土壤剖面各离子含量及全盐量变化趋势

Fig. 8 Trends in the content of various ions and total salinity in S1 and S3 barren land soil profiles

递减；剖面达3 m以下土壤含盐量及各离子浓度变化均趋于稳定，呈现小范围内波动。S3（图8b）土壤全盐量在距地面0.4 m处达到最高值3.99 g·kg^{-1}，随后各离子含量（除CO_3^{2-}）及全盐量均呈现波动变化，在1.8~2.2 m处下降较大，当剖面深度达到2.2 m以下变化幅度较小，变化趋于稳定。从各离子含量来看，S1、S2剖面占据较大比重的离子分别为Na^+、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-和Cl^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}，其浓度均同全盐量表现出一致的变化过程，可能原因是由它们组成的可溶性盐构成了包气带土壤中的主要盐分，是导致该剖面土壤盐渍化的最主要因素。故原始荒漠S1、S3点位调查包含离子浓度及全盐量波动较大的剖面，当深度分别达到1.8 m和2.2 m时即为土壤水盐运移引发地表积盐的最大深度。

结合荒漠区土壤含水量的垂直分布和三种主要植物的根系分布情况（图9），琵琶柴是浅根系植物，根系分布范围为0~0.8 m，在0~0.6 m的深度分布其93%的根系，主要水源为降水；多枝柽柳是典型深根植物，根系分布范围是0.5~3.1 m，在0~0.6 m，根系分布较少，吸收根表面积不到其总吸收根表面积的5%；在地表以下2~3.1 m的深度范围内分布了其70%的总吸收根表面积，主要水源为地下水；梭梭为区域的主要优势物种，根系分布范围是0~2.5 m，主要水源为地下水和降水。总体而言，各采样点农田与相邻荒地的土壤盐离子在剖面中呈现出不同的分布特征，然而土壤剖面各离子含量及全盐量的变化整体多集中在3 m以上土层；同时，荒漠植物根系主要分布范围在3 m以上。当土壤深度达到3 m以下，其水盐运移引发地表积盐对地表自然环境、地表覆盖（植物根系）和人类活动（耕作）等的影响变弱。因此，中部平原绿洲区内部调查深度为3 m时，即可满足区域地表基质调查的需求。

3.2.3 北部沙漠区调查深度 北部沙漠区多为固定、半固定沙丘，从南缘到腹地，植被盖度逐渐降低。主要植被类型为梭梭、多枝柽柳和琵琶柴，其中，梭梭属植物为主要优势种、建群种。根据现有数据资料，分析北部沙漠区梭梭、白梭梭根系在土壤中的垂直分布特征。从图10a中可以看出，梭梭根表面积分布比例在0~10 m土层中，随深度的增加而减少；在0~3 m土层中，分布根系的根表面积占总根表面积的55.02%。从图10 b中可知，在0~3 m土层中白梭梭分布根系的根表面积占总根表面积的70.86%；在0~10 m土层中占94.29%。综合来看，区域主要植被类型的根系分布主要集中在0~10 m土层中。结合实际调查实施的可行性，在本地表基质分类体系中，我们认为北部沙漠区调查深度达到10 m即可体现其支撑植被群落的作用，满足地表基质调查的需求。

4 讨 论

不同区域的地表基质调查侧重点不同，调查深度的确定应在区域生态功能需求的基础上，综合考虑能够对生态系统产生影响的下限深度，不宜设置统一标准。侯红星等[2]认为，除地势低洼区域外，一

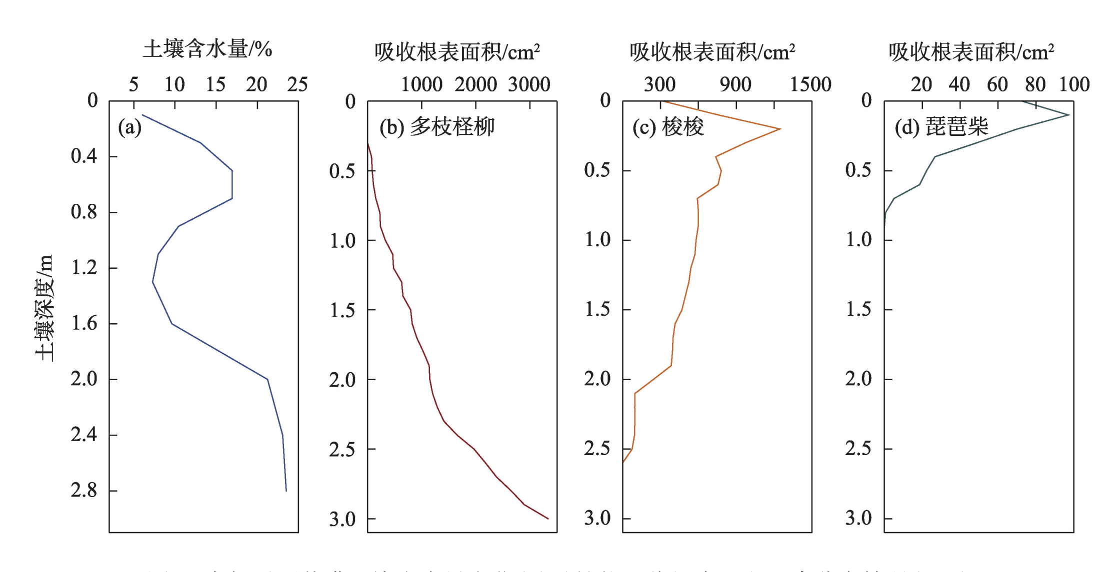


图9 中部平原荒漠土壤含水量变化(a)及植物吸收根表面积垂直分布情况(b~d)

Fig. 9 Vertical in soil water content (a) and vertical distribution of plant absorbing root surface area (b-d) in the central plains region

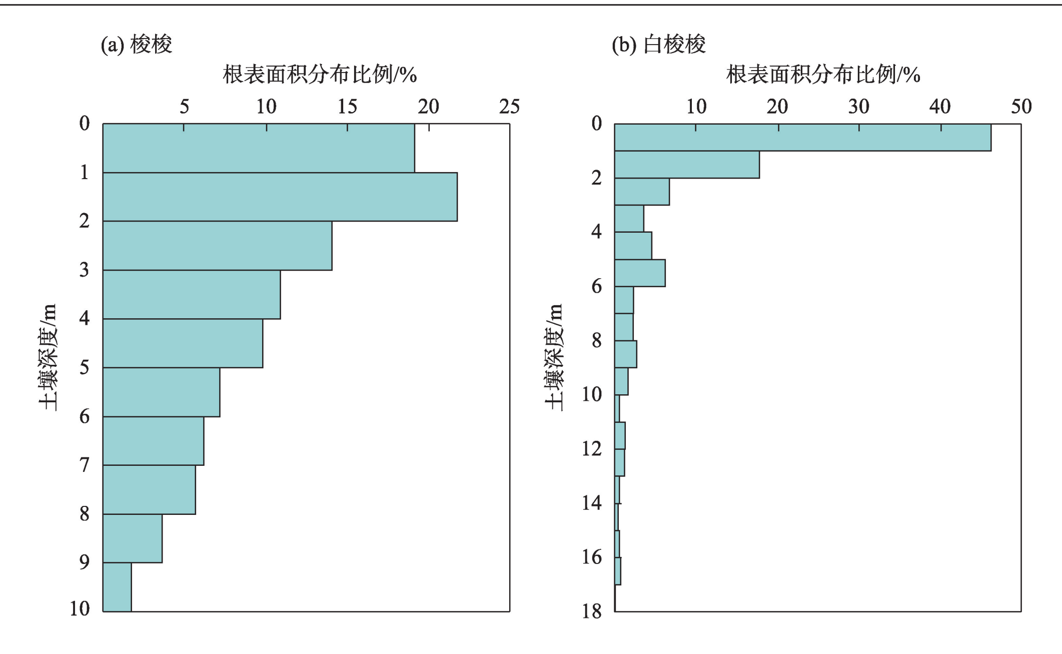


图10　北部沙漠区梭梭(a)及白梭梭(b)根表面积垂直分布情况

Fig. 10　Vertical distribution of root area of (a) *Haloxylon ammodendron*, and (b) *Haloxylon persicum* of the northern desert region

般调查深度包含表层附着物、土壤耕作层和植物根系所能达到的深度，即可满足地表基质调查深度要求。本研究从地表基质主要服务植被群落科学绿化和生态保护的角度出发，主要基于地表植被覆盖探讨地表基质的划分，故在实际调查中还需考虑地表基质对植被影响较大的因素。在本方案中，由于不同地貌分区支撑服务生态安全的目标不同，可根据覆盖层特征及土壤性质对地表基质层调查深度进行调整。基于前人对地表基质调查深度的研究[3]，对本研究区可综合考虑以下几方面信息展开讨论，以确定地表基质层的调查深度：(1) 浅层地下水位的波动下限或基岩的不规则顶面。(2) 水盐运移引发地表积盐的深度。(3) 地表植被根系能够达到的深度。

研究区南部山区分布着基岩风化壳和残坡积物，相关研究表明，土壤养分为限制中山森林带优势物种雪岭云杉生长发育的关键环境因子[23]。中山森林区优势物种雪岭云杉浅层根系发达，主要利用水源来自表层土壤[24]；该区域0~20 cm土层土壤含水量高，营养物质在表层聚集，成土条件作用于土壤的深度较浅[25]，pH值与电导率各层间差异不显著[23]。结合区域地表基质关键层实际植物根系分布情况(图6)可以得出，南部山区地表基质调查深度达到50 cm即可满足支撑服务植被群落的功能需求。

中部平原区的土壤母质主要为第四系冲洪积物或风成沉积物，据地下水环境监测资料及相关文献[26]，新疆三工河流域50%的绿洲区地下水埋深大于10 m，土壤盐渍化程度为轻度盐渍化。由于中部平原区以农田为主，一般农作物的根系集中分布在表层土壤(即耕作层)，我们认为区域一般调查深度以土壤水盐运移引发地表积盐深度为宜。剖面易溶盐离子含量及全盐量变化趋势表明，中部平原区绿洲内部农田和原始荒地剖面深度达到2.2 m即可。冲积洪积扇下部、古尔班通古特沙漠南缘的原始盐生、旱生荒漠地势平坦，表层分布的第四系松散沉积物厚度大于5 m，区域地下潜水水位在10 m左右[27]。主要植被类型为梭梭、多枝柽柳和琵琶柴，植物根系的空间分布范围和深度很大程度决定了其水分获取途径[28]。孙芳强等[29]通过分析土壤剖面Cl^-含量和氢氧同位素信息，证实该区域土壤水并非来源于地下水的补给，而是来源于大气降水或降雪的入渗补给。相关研究也表明梭梭在不同时期获取水分的主要来源不同，可以同时利用地下水和降水[30]，主要利用浅层和中层土壤水分[31]。综合考虑土壤化学性质、植被根系及地下水分布和利用情况得出，中部平原绿洲区内部调查深度以3 m为宜。

北部沙漠区调查深度应以观测到地表植被地下根系深度为宜，土壤水是植被生长所需水分的直接来源，紧密联系着大气–植被–土壤–地下水系统[32-33]；

仅凭干旱荒漠区稀少的天然降水无法满足一些植物正常的生长需求,地下水也成为植物用水的重要组成部分[34-35]。由于沙漠区降雨稀少,地表径流极少,土壤水的来源通常只有大气降水和地下水;同时风沙土具有良好的渗透性,区域地下水埋深较大。由于浅根系占比较大,多分布在0~3 m接近地表的土层中,根系整体分布在0~10 m土壤中,这可以使植被在干旱的生境中最大限度的利用地表水分与养分。

5 结论

本文基于地表基质的科学内涵及现有研究,在分析干旱区已有相关土壤调查基础上,结合植被特征,得出以下结论:

(1) 提出了干旱区地表基质分区细化分类新思路:从自然资源地表基质与地表覆盖关系紧密的角度出发,结合地貌类型、代表性区域范围、植被覆盖等与分类方案的对应关系,将研究区划分为南部山区(包括高山草甸、中山森林和低山丘陵)、中部平原区(冲洪积扇和冲洪积平原)和北部沙漠区,分区构建适用于研究区的地表基质分类体系。

(2) 根据分类思路完成了三工河流域地表基质细化分类:岩质的三级分类依据成因类型与岩质坚硬程度划分为3个二级类和7个三级类,砾质依据成因类型与地貌类型划分为4个二级类和7个三级类,土质依据成土过程与土壤性质划分为9个二级类和14个三级类;此外,根据区域特性,一级类增加其他类(隔水层黏土)。

(3) 综合典型土壤剖面盐离子含量、地下水及植被根系分布特征,研究区南部山区地表基质调查深度以50 cm为宜,中部平原区绿洲内部调查深度为3 m,以水盐运移引发地表积盐深度为宜,北部沙漠区小于10 m为宜。

参考文献(References):

[1] 自然资源部办公厅关于印发《地表基质分类方案(试行)》的通知[EB/OL]. 2020, http://gi.mnr.gov.cn/202012/t20201222_2596025.html. [Ministry of Natural Resources. Notice of the General Office of the Ministry of Natural Resources Printing and Distributing the Ground Cover Layer Classification Scheme (Trial) [EB/OL]. 2020, http://gi.mnr.gov.cn/ 202012/t20201222_2596025.html.]

[2] 侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等. 自然资源地表基质层调查技术方法新经验——以保定地区地表基质层调查为例[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 277-288. [Hou Hongxing, Zhang Shuji, Lu Min, et al. New experience of the natural resources ground substrate layer survey technology method: Taking Baoding area ground substrate layer survey as an example[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 277-288.]

[3] 殷志强, 陈自然, 李霞, 等. 地表基质综合调查:内涵、分层、填图与支撑目标[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 144-151. [Yin Zhiqiang, Chen Ziran, Li Xia, et al. Connotation, layering, mapping and supporting objectives of the integrated survey of ground substrates[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 144-151.]

[4] 孙禧勇, 许玮, 王明建. 地表基质层分层分类调查研究[J]. 中国土地, 2022(7): 34-36. [Sun Xiyong, Xu Wei, Wang Mingjian. Investigative study on stratification and classification of surface substrates layers[J]. China Land, 2022(7): 34-36.]

[5] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报, 2015, 70(12): 1859-1869. [Zhu Yongguan, Li Gang, Zhang Ganlin, et al. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. Acta Geographica Sinca, 2015, 70(12): 1859-1869.]

[6] 殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 等. 地表基质分类及调查初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 8-14. [Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Zhang Shuji, et al. Preliminary study on classification and investigation of surface substrate[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(6): 8-14.]

[7] 葛良胜, 侯红星, 夏锐. 自然资源地表基质调查技术体系构建[J]. 地理信息世界, 2022, 29(5): 20-27. [Ge Liangsheng, Hou Hongxing, Xia Rui. Construction of technical system for ground substrate survey of natural resources[J]. Geomatics World, 2022, 29(5): 20-27.]

[8] 艾晓军, 陈占生, 耿国帅, 等. 辽阳—丹东地区黑土地地表基质有效土层分布规律及影响因素——以凤城市为例[J]. 河北农业科学, 2023, 27(3): 54-59, 65. [Ai Xiaojun, Chen Zhansheng, Geng Guoshuai, et al. Distribution patterns and influencing factors of effective soil layers in the surface matrix of black soil in Liaoyang-dandong area—Taking Fengcheng city as an example[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2023, 27(3): 54-59, 65.]

[9] 霍东, 陈占生, 艾晓军, 等. 遥感解译在辽阳-丹东地区黑土地地表基质调查中的应用——以宽甸满族自治县为例[J]. 农业与技术, 2023, 43(15): 115-119. [Huo Dong, Chen Zhansheng, Ai Xiaojun, et al. Application of remote sensing interpretation in surface substrate investigation of black soil in Liaoyang-dandong region: Taking Kuandian Manchu Autonomous County as an example[J]. Agriculture and Technology, 2023, 43(15): 115-119.]

[10] 刘洪博, 孔繁鹏, 赵建, 等. 地表基质调查技术方法探索与实验——以黑龙江省宝清县黑土地调查为例[J]. 地理信息世界, 2022, 29(6): 1-5. [Liu Hongbo, Kong Fanpeng, Zhao Jian, et al. Exploration and experiment of surface substrate investigation technique: A case study of black soil investigation in Baoqing County,

Heilongjiang Province[J]. Geomatics World, 2022, 29(6): 1-5.]

[11] 孙勇刚, 张闯, 尚晓雨, 等. 不同地表基质类型理化性质探索与研究——以河北塞罕坝示范区为例[J]. 资源信息与工程, 2023, 38(2): 13-16. [Sun Yonggang, Zhang Chuang, Shang Xiaoyu, et al. Exploration and study on physiochemical properties of different ground substrate types: Taking the Saihanba demonstration area in Hebei Province as an example[J]. Resource Information and Engineering, 2023, 38(2): 13-16.]

[12] 王根绪, 程国栋. 干旱荒漠绿洲景观空间格局及其受水资源条件的影响分析[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 363-368. [Wang Genxu, Cheng Guodong. The spatial pattern and influence caused by water resources in arid desert oases[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(3): 363-368.]

[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. [Lu Rukun. The Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.]

[14] 和清华, 谢云. 我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 308-319. [He Qinghua, Xie Yun. Research on the climatological calculation method of solar radiation[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 308-319.]

[15] 栾海军, 邢宸硕, 张荣凯, 等. 基于Chen NDVI模型的NDVI尺度转换分形特性分析[J]. 遥感信息, 2022, 37(3): 12-20. [Luan Haijun, Xing Chenshuo, Zhang Rongkai, et al. Analysis of fractal characteristics of NDVI scale conversion based on Chen NDVI model [J]. Remote Sensing Information, 2022, 37(3): 12-20.]

[16] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300. [Zhu Wenquan, Chen Yunhao, Xu Dan, et al. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(3): 296-300.]

[17] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算——以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Long Zhonghua, et al. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(3): 300-307.]

[18] Yang H, Zhong X, Deng S, et al. Assessment of the impact of LUCC on NPP and its influencing factors in the Yangtze River basin, China[J]. Catena, 2021, 206: 105542.

[19] Hu C, Zhang L, Wu Q, et al. Response of LUCC on runoff generation process in Middle Yellow River Basin: The Gushanchuan Basin[J]. Water, 2020, 12(5): 1237.

[20] 尹小君, 祝宏辉, Gao Gerry, 等. 气候变化和人类活动对天山北坡净初级生产力变化的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 195-202. [Yin Xiaojun, Zhu Honghui, Gao Jerry, et al. Effects of climate change and human activities on net primary productivity in the Northern Slope of Tianshan, Xinjiang, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (20): 195-202.]

[21] 陈炳铭, 赵善超, 孙丰华, 等. 气候变化和人类活动对干旱区垂直自然带NPP的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1474-1483. [Chen Bingming, Zhao Shanchao, Sun Fenghua, et al. Impacts of climate change and human activities on the NPP of vertical natural belts in arid zones[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(6): 1474-1483.]

[22] 郝鑫怡, 张喆, 郑浩, 等. 天山北坡经济带植被覆盖度动态变化研究[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2): 1020-1031. [Hao Xinyi, Zhang Zhe, Zheng Hao, et al. Dynamic change of vegetation cover in the economic zone of the northern slopes of Tianshan Mountains[J]. China Environmental Science, 2024, 44(2): 1020-1031.]

[23] 李艳忠, 罗格平, 许文强, 等. 天山北坡三工河流域中山带森林发育与气候土壤的关系[J]. 山地学报, 2011, 29(1): 33-42. [Li Yanzhong, Luo Geping, Xu Wenqiang, et al. Forest development and their relationships with climatic and soil in the mid-mountain area of Sangong River watershed, northern slope of Tianshan Mountains[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(1): 33-42.]

[24] 田胜川, 赵善超, 郑新军, 等. 天山不同海拔雪岭云杉生长季水分来源[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 436-444. [Tian Shengchuan, Zhao Shanchao, Zheng Xinjun, et al. Water source of spruce (*Picea schrenkiana*) at different altitudes in the Tianshan Mountains during the growing season[J]. Arid Zone Research, 2023, 40 (3): 436-444.]

[25] 宋昕妮, 李路, 常亚鹏, 等. 天山北坡雪岭云杉林叶片-土壤氮磷化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 97-104. [Song Xinni, Li Lu, Chang Yapeng, et al. Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in leaves and soils of *Picea* schrenk's spruce forest on the northern slope of the Tianshan Mountains[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(9): 97-104.]

[26] 龙威夷, 施建飞, 李双媛, 等. 流域绿洲土壤盐分多模型反演效果评估[J]. 干旱区研究, 2024, 41(7): 1120-1130. [Long Weiyi, Shi Jianfei, Li Shuangyuan, et al. Evaluation of multimodel inversion effects on soil salinity in oasis basin[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(7): 1120-1130.]

[27] 孙芳强, 尹立河, 马洪云, 等. 准噶尔盆地南缘土壤水运移特征及其补给来源识别[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1271-1277. [Sun Fangqiang, Yin Lihe, Ma Hongyun, et al. Identification of soil water migration and recharge sources in the southern marginal zone of the Junggar Basin China[J]. Arid Zone Research, 2017, 34 (6): 1271-1277.]

[28] 董雪, 李永华, 辛智鸣, 等. 唐古特白刺叶性状及叶片$\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$沿降水梯度的变化特征[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3700-3709. [Dong Xue, Li Yonghua, Xin Zhiming, et al. Variation in leaf traits and leaf $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ content in *Nitraria tangutorum* along precipitation gradient[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (10): 3700-3709.]

[29] 孙芳强, 尹立河, 王晓勇, 等. 新疆三工河流域厚层包气带区地下水垂向补给量的厘定[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 913-923. [Sun Fangqiang, Yin Lihe, Wang Xiaoyong, et al. Determination of

vertical infiltration recharge of groundwater in the thick unsaturated zone of Sangong River Basin, Xinjiang[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 913–923.]

[30] 戴岳, 郑新军, 唐立松, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态[J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1214–1225. [Dai Yue, Zheng Xinjun, Tang Lisong, et al. Dynamics of water usage in *Haloxylon ammodendron* in the southern edge of the Gurbantünggüt Desert[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(11): 1214–1225.]

[31] 徐贵青, 李彦. 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 130–137. [Xu Guiqing, Li Yan. Roots distribution of three desert shrubs and their response to precipitation under co-occurring conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 130–137.]

[32] Zeng J, Li Z, Chen Q, et al. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 163: 91–110.

[33] Luo M, Meng F, Sa C, et al. Response of vegetation phenology to soil moisture dynamics in the Mongolian Plateau[J]. Catena, 2021, 206: 105505.

[34] 赵文智, 刘鹄. 荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2702–2708. [Zhao Wenzhi, Liu Hu. Recent advances in desert vegetation response to groundwater table changes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2702–2708.]

[35] 徐海量, 宋郁东, 王强, 等. 塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(3): 400–405. [Xu Hailiang, Song Yudong, Wang Qiang, et al. The effect of groundwater level on vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(3): 400–405.]

Construction of a refined classification system and survey depth of underground for natural resource ground substrates in arid zones

LI Shuangyuan[1,2,3,4], XU Zhu[5], WANG Yugang[2,3,4], SUN Jinjin[2,3,6]

(1. Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Beijing 100055, China; 2. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Land; Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Fukang Station of Desert Ecology, Chinese Academy of Sciences, Fukang 831505, Xinjiang, China; 5. Bogda Eco-environmental Station in Tianchi Management Committee, Fukang 831500, Xinjiang, China; 6. Field Observation and Research Station of Water Resources and Ecological Effect in Lower Reaches of Tarim River Basin, Urumqi 830057, Xinjiang, China)

Abstract: The classification of the ground substrate is a fundamental basis for conducting ground substrate surveys and monitoring. It reveals the synergistic coupling relationship between the ground substrate and the surface cover layer, which aids in understanding the mechanisms of interaction between the ground substrate and the ecological environment from both the surface cover and subsurface spatial elements. This study targeted the Sangong River Basin in Xinjiang, a typical inland river basin in an arid region. Based on the heterogenous distribution of the mountain-oasis-desert landscape in arid regions, a three-tier classification and zoning system for ground substrates was developed, considering the distribution area, elevation range, and main surface cover of the surface substrates. The overall classification was divided into four primary categories, 17 secondary categories, and 28 tertiary categories. Considering the physical and chemical properties of the soil and the distribution characteristics of vegetation root systems, the suitable survey depth for ground substrates in the southern mountainous area was 50 cm; in the central plain area, it was 3 m; and in the northern desert area, it was less than 10 m. Additionally, based on the differentiation characteristics of Net Primary Productivity in vertical zonal ecosystems, the rationality of the classification system was validated, reflecting the role of ground substrate layers in nurturing and supporting land cover. These results provide theoretical and technical support for future natural resource surveys, monitoring, and scientific management decisions in arid regions.

Keywords: ground substrate; classification of ground substrate; survey depth of underground; arid area; Sangong River Basin